УДК 537.521.7:621.315.61

ДИАГНОСТИКА ПРЕДПРОБИВНОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПО ТЕПЛОВЫМ ЭФФЕКТАМ

О.С. Гефле, Е.И. Черкашина

Государственное научное учреждение "Научно-исследовательский институт высоких напряжений при ТПУ". г. Томск
E-mail: polymer@hvd.tsk.ru

Представлены методика и результаты исследования процесса зарождения и развития дендритов в полимерных диэлектриках тепловизионным и оптическим методами. Установлено, что процесс зарождения и развития дендритов имеет ступенчатый во времени характер, сопровождающийся локальным повышением перепада температуры на поверхности диэлектрика в 1,5...2,0 раза. Обнаружена корреляционная связь между начальной и предпробивной стадиями разрушения диэлектриков. Показана возможность индивидуальной диагностики предпробивного состояния и времени до пробоя как полярных, так и неполярных полимерных диэлектриков.

Введение

Создание крупных энергетических систем для производства и потребления электроэнергии ведет к ужесточению режимов работы высоковольтных изоляционных конструкций вследствие увеличения передаваемой мощности и рабочего напряжения. Внезапный отказ высоковольтных конструкций, обусловленный пробоем изоляции, приводит к аварийному простою оборудования и значительным экономическим потерям.

Все более широкое применение твердых полимерных диэлектриков в виде монолитных изоляционных конструкций в энергетике и импульсной технике диктует необходимость разработки эффективных методов диагностики их предпробивного состояния в электрическом поле. Известно, что наиболее частой причиной пробоя монолитной полимерной изоляции является образование дендритов в области локального усиления электрического поля. Зарождение дендритов может происходить в результате одновременного воздействия множества факторов, таких как:

1) неидеальный контакт между поверхностью электрода и диэлектриком, что обуславливает возникновение частичных разрядов (ЧР) и эрозию диэлектрика [1–4];
2) наличие внутренних механических напряжений, что может быть причиной образования, как объемного заряда, так и субмикротрещин [5–7];
3) возникновение критических локальных полей вследствие инжекции носителей заряда из электрода или экстракции из диэлектрика [7–9];
4) повышение температуры, обусловленное диэлектрическими потерями как за счет ионизационных процессов, так и за счет миграционной или дипольно-релаксационной поляризации молекул полимеров [10, 11].

В [10, 11] показано, что на стадии, предшествующей зарождению дендрита, повышение температуры в неполярных и полярных полимерных диэлектриках составляет не более 1...4 °С. Это означает, что термодеструкция молекул полимера на додендритной стадии старения невозможна. С другой стороны, такого повышения температуры вполне достаточно для обнаружения начальной стадии разрушения диэлектриков существующими методами дистанционной термометрии.

В этой связи основной целью данной работы являлось исследование зарождения и развития разрушения в полярных и неполярных диэлектриках тепловизионным и оптическим методами для оценки возможности индивидуальной диагностики их предпробивного состояния по тепловым эффектам.

Методика эксперимента и образцы

В качестве исследуемых материалов были выбраны полимерные диэлектрики: полиметилметакрилат (ПММА) – полярный полимер аморфной структуры и полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) – неполярный полимер с частично-кристаллической структурой. Эти материалы находят широкое применение в качестве изоляции высоковольтных конструкций в энергетике и импульсной технике.

С целью повышения достоверности информации о процессе формирования и развития разрушения в твердых диэлектриках исследования проводились двумя методами: оптическим и тепловизионным. Для реализации этих методов была собрана экспериментальная установка, состоящая из источника высокого напряжения, оптической системы и тепловизора (рис. 1).

Оптическая система выполнена на базе волоконного регулярного световода с диаметром торцевых площадок 10 мм, микроскопа МИМ-7 и фотоаппарата. Формирование изображения дендрита в плоскости входного торца световода и его предварительное увеличение осуществлялось с помощью объектива с фокусным расстоянием 78 мм. В качестве источника света применялась галогенная лампа.

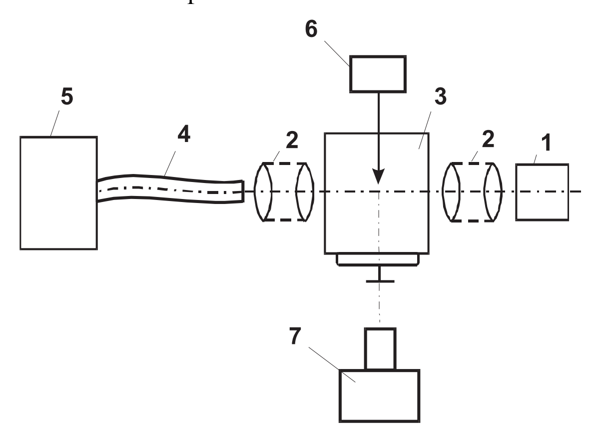


Рис. 1. *Схема установки: 1) источник света; 2) система линз; 3) образец; 4) световод; 5) микроскоп; 6) источник высокого напряжения; 7) тепловизор*

Для определения температуры поверхности испытываемых образцов применялся тепловизор AGA-680 со следующими техническими параметрами: время сканирования одного кадра изображения – 1/16 с; полное разрешение – 14000 элементов; угол полного визирования – 174×174 мрад; угол мгновенного визирования – 1,3 мрад; область сканирования – 11,5×11,5 см при фокусном расстоянии 0,95 м. Тепловизор позволяет регистрировать минимальный перепад температуры 0,2 °С и производить прямой отсчет температуры от +20 до +40 °С в диапазоне длин волн λ=8...14 мкм с относительной погрешностью не более 5 %. Максимальное значение обнаружительной способности и постоянная времени приемника излучения составляют $9\cdot10^{10}$ см·Вт$^{-1}$·Гц (λ=10 мкм) и 10^{-6} с, соответственно. Контроль температуры поверхности образца в процессе эксперимента осуществлялся с помощью эталонного источника излучения с коэффициентом излучения 0,97. Регулируемый диапазон температур источника излучения находится в пределах от +16 до +40 °С, точность задания температуры – 0,2 °С. Для оценки достоверности определения температуры поверхности образца по эталонному излучателю производился контроль температуры окружающей среды ртутным термометром с ценой деления 0,1 °С.

При измерении температуры поверхности образца T_0 [°С], равной температуре окружающей среды, и локального перепада температуры $\Delta T_i=T_i-T_0$, где T_i [°С] – температура локальной области поверхности образца с повышенной интенсивностью излучения, использовалось видеоконтрольное устройство "Изотерма". Это устройство позволяет наблюдать температурные контуры на объекте внутри узкого диапазона температур, выбранного регулятором чувствительности. При этом уровень чувствительности может изменяться от 1 до 1000 °С. Ширина изотермы и ее уровень считываются по изотермической шкале делений с помощью маркеров. Измерение локального перепада температуры и температуры поверхности образца производилось при значениях уровня чувствительности 2, 5 и 10 °С. При измерении разности температур и абсолютных температурных уровней "Изотерма-1" использовалась для контроля температуры эталонного источника, а "Изотерма-2" – для образца.

Температура поверхности образца и разность температур вычислялись по формулам:

$$T_0 = T_э - T_ч\,(I_1 - I_{20}),$$

$$T_i = T_ч\,(I_{21} - I_{20}),$$

где $T_э$, °С – температура эталонного источника излучения, $T_ч$, °С – уровень чувствительности, I_1 – показание маркера "Изотерма-1", соответствующее температурному уровню эталонного источника излучения в изотермических (безразмерных) единицах, I_{20} и I_{21} – показания маркеров "Изотерма-2" соответствующие температуре поверхности образца и области повышенной температуры в изотермических единицах. Цена деления шкалы изотермических уровней составляла 0,01.

Время появления локального перепада температуры на поверхности образцов и время зарождения дендритов в образце контролировалось таймером с временным разрешением 0,01 с.

Испытания проводились на образцах в системе электродов острие-плоскость. Такая система электродов широко используется для моделирования микродефектов в полимерной изоляции, обуславливающих локальное усиление электрического поля и, как следствие, ускорение процесса зарождения дендритов. В качестве электрода-острия применялись стальные иглы диаметром 1 мм с радиусом закругления острия r=5...20 мкм, контролируемого с помощью микроскопа МИМ-7 при 600-кратном увеличении с ценой деления измерительной сетки 1 мкм. Допустимое отклонение радиуса закругления не превышало ±0,5 мкм. Межэлектродное расстояние изменялось от 5 до 15 мм. Высота образцов выбиралась из условия исключения перекрытия их по поверхности и составляла не менее 50 мм. Для исключения коронирования иглы в образец вставлялась латунная трубка диаметром 10 и высотой 80 мм, которая соединялась с иглой посредством сменного металлического стержня.

Испытания образцов проводились на переменном напряжении промышленной частоты 50 Гц.

Источником высокого напряжения служил аппарат АИИ-70. Измерение величины испытательного напряжения осуществлялось с помощью электростатического киловольтметра С-196 класса точности 1. Действующее значение испытательного напряжения изменялось от 15 до 25 кВ, при этом напряжение на образцы подавалось скачком. При каждом значении U, r и d испытывалось не менее 10 образцов. Контроль температуры поверхности каждого образца осуществлялся непрерывно во времени вплоть до пробоя. Перед испытанием производилось кондиционирование всех образцов при температуре 20 °С в течение суток.

Расчет максимальной напряженности в системе электродов острие-плоскость (для электродов гиперболоид вращения-плоскость) производился по формуле [12]:

$$E_M = \frac{2U}{r\ln(4d/r)}, \quad \text{В/м},$$

где U, В – амплитудное значение приложенного напряжения, r, м – радиус закругления острия и d, м – расстояние между электродами.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

При исследовании динамики процесса разрушения ПММА тепловизионным и оптическим методами были обнаружены следующие закономерности.

Независимо от условий испытаний (величины напряжения, радиуса закругления острия и межэлектродного расстояния) при появлении локального перепада температуры ΔT_1 на поверхности образцов никаких изменений в материале вблизи острия не наблюдалось. Вплоть до зарождения дендрита перепад температуры на поверхности образцов оставался постоянным, но в течение этого времени на расстоянии 5...10 мкм от острия наблюдалось изменение оптической плотности материала.

Возникновение дендрита сопровождалось повышением локального перепада температуры ΔT_2 в 1,5...2 раза. После прорастания дендрита развитие его вглубь промежутка тормозилось, а перепад температуры оставался постоянным вплоть до следующего "скачка" дендрита. Следующий "скачок" дендрита вновь сопровождался повышением локального перепада температуры ΔT_3 в 1,5...2 раза, который оставался постоянным вплоть до пробоя образцов. Лишь непосредственно перед пробоем наблюдался колебательный характер изменения ΔT, что может быть обусловлено осцилляциями тока при формировании канала пробоя, замыкающего электроды [13–17]. Таким образом, для процесса зарождения и развития разрушения ПММА характерно наличие трех температурных ступеней (рис. 2), что подтверждает дискретный во времени и пространстве процесс разрушения твердых диэлектриков в резконеоднородном поле [10, 13, 18–20].

Первая температурная ступень соответствует додендритной стадии, в течение которой происходит изменение оптической плотности материала. Изменение оптической плотности материала на ранней стадии старения может быть обусловлено несколькими причинами:

– деструкцией молекул полимера вследствие их взаимодействия с инжектированным объемным зарядом;
– образованием суб- и микротрещин под действием пондеромоторных сил;
– повышением концентрации разорванных связей вследствие нарушения термофлуктуационного равновесия.

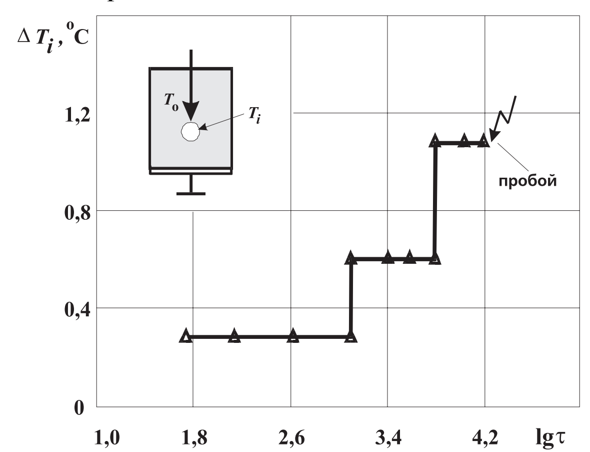


Рис. 2. *Типичный характер изменения локального перепада температуры $\Delta T_i = T_i - T_0$ на поверхности образца ПММА во времени*

Отсутствие ЧР на этой стадии старения полимерных диэлектриков [1, 8, 9] дает основание предположить, что локальный нагрев ПММА вблизи острия обусловлен повышенными диэлектрическими потерями, связанными с дипольно-релаксационной и миграционной поляризацией, так как при f=50 Гц тангенс угла диэлектрических потерь ПММА составляет 0,06 даже в слабом электрическом поле (E=10^3...10^4 В/м). Кроме того, повышенное тепловыделение в области локального усиления поля может быть связано с ростом активной составляющей тока за счет увеличения концентрации свободных и слабосвязанных носителей заряда, обусловленного перечисленными выше процессами. Неизменность значения ΔT_1 вплоть до зарождения дендрита свидетельствует о постоянстве мощности источника тепловыделения, которым является локальный объем диэлектрика, активно выделяющий тепло вследствие диэлектрических потерь.

Вторая температурная ступень включает промежуток времени от момента зарождения дендрита до его очередного "скачка". Поскольку зарождение дендрита сопровождается возникновением частичных разрядов [1], то увеличение ΔT_2 на поверхности образцов обусловлено дополнительным нагревом материала вследствие диссипации энергии ЧР в каналах дендрита. Постоянство ΔT_2 на этом временном интервале свидетельствует также о том, что тепловыделение в зоне разрушения не изменяется.

Это может быть обусловлено интегрированием теплового потока за счет теплоемкости и теплопроводности твердого диэлектрика, окружающего каналы дендрита [10].

Третья температурная ступень характеризует предпробивную стадию и включает интервал времени от момента второго "скачка" дендрита до пробоя. Повышение температуры на этой стадии обусловлено увеличением интенсивности ЧР из-за увеличения числа каналов и линейных размеров дендрита. Типичные картины изменения температуры поверхности образцов в процессе зарождения и роста дендрита в ПММА показаны на рис. 3. Светлое пятно на рис. 3, *б*, *в* соответствует области повышенной температуры.

При исследовании температурно-временных параметров процесса разрушения ПЭНП был установлен аналогичный характер изменения $\Delta T=f(\tau)$. Однако в отличие от ПММА, появление локального перепада температуры на додендритной стадии старения ПЭНП не наблюдалось вплоть до зарождения дендрита. Согласно [10, 11] максимальное повышение температуры ПЭНП за счет диэлектрических потерь в области локального усиления поля составляет не более 1 °С, а локальный перепад температуры на поверхности образца не может превышать 0,1 °С. Поэтому исследование тепловых процессов на додендритной стадии старения неполярных диэлектриков возможно лишь при более высоком температурном разрешении тепловизора (не менее 0,05 °С).

Первая температурная ступень для образцов из ПЭНП включает интервал времени от момента зарождения дендрита до его очередного "скачка". Постоянство ΔT_1 на этом интервале времени свидетельствует о том, что интегральное тепловыделение в зоне разрушения не изменяется, так же, как и в случае ПММА.

Процесс роста дендрита (вторая и третья температурные ступени) сопровождается увеличением перепада температуры ΔT_2 и ΔT_3 в 1,5...2 раза, причем перепад температуры на этих временных интервалах также остается постоянным. Лишь непосредственно перед пробоем образцов наблюдается колебательный характер изменения температуры, что может быть обусловлено осцилляциями тока при формировании канала пробоя, замыкающего электроды. В таблице для примера приведены температурно-временные параметры процесса разрушения ПММА и ПЭНП.

Видно, что независимо от типа диэлектриков (структуры и полярности) зарождение дендрита и переход от предыдущей к последующей стадии разрушения всегда сопровождается увеличением перепада температуры в 1,5...2 раза. Этот экспериментальный факт является наиболее существенным с точки зрения индивидуальной диагностики времени до пробоя полимерных диэлектриков.

Можно предположить, что в связи с дискретным во времени и пространстве характером разрушения полимерных диэлектриков, аналогично происходит перераспределение потенциала в межэлектродном промежутке. Вследствие перераспределения потенциала может возрастать средняя напряженность поля между разрушенным участком изоляции и плоским электродом, что приводит к увеличению диэлектрических потерь и проводимости, а, следовательно, и мощности источника тепла.

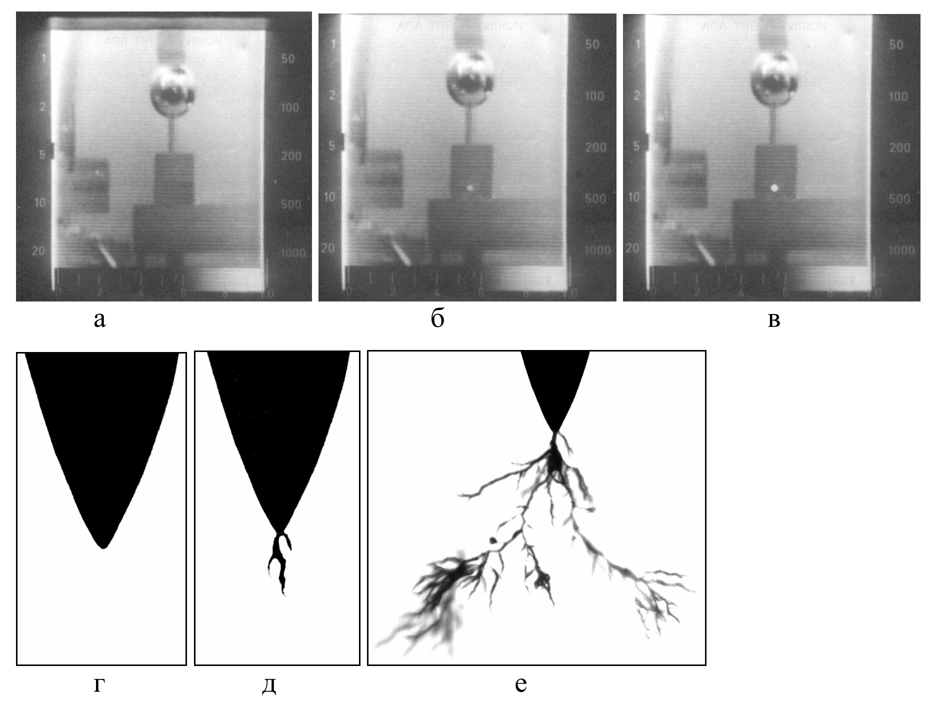


Рис. 3. *Полутоновые картины теплового поля на поверхности образцов ПММА (а, б, в) и соответствующие им оптические картины (г, д, е): а), г) до подачи напряжения; б), д) при зарождении дендрита; в), е) на стадии развития дендрита*

Таблица. *Температурно-временные параметры процесса разрушения ПММА и ПЭНП в резконеоднородном поле*

Материал	$E_м$, 10^8 В/м	Эксперимент				Расчет	
		$\tau_1/\Delta T_1$, с/°С	$\tau_2/\Delta T_2$, с/°С	$\tau_3/\Delta T_3$, с/°С	$\tau_{пр}/\Delta T_{пр}$, с/°С	τ_3, с	$\tau_{пр}$, с
ПММА	4,4	57/0,2	4540/0,3	10350/0,6	23095/0,8	10377	23673
	4,7	54/0,2	4915/0,3	9256/0,6	22030/0,8	9830	22427
	5,6	50/0,2	3870/0,4	8835/0,6	20155/1,0	9103	20766
	10,3	32/0,3	2367/0,5	5400/0,8	14117/1,2	5826	13290
	13,6	40/0,2	2433/0,4	7305/0,7	18320/0,8	7646	17443
	15,3	24/0,3	518/0,6	3970/0,8	10824/1,2	4369	9968
ПЭНП	5,1	1803/0,2	19025/0,4	48088/0,6	87524/0,8	47323	85349
	5,3	2659/0,2	25620/0,4	65980/0,7	132780/0,8	68760	124012
	6,6	1402/0,2	19860/0,3	39550/0,6	69710/0,9	36255	65388
	17,1	1560/0,2	16640/0,4	38256/0,7	78825/0,8	40340	72756
	17,5	750/0,3	6632/0,5	18628/1,0	35220/1,2	19395	34979
	17,8	580/0,3	7432/0,6	14100/1,0	29820/1,2	15000	27050
	18,2	420/0,3	6203/0,6	11950/1,1	19820/1,5	10860	19588

С другой стороны, по мере увеличения линейных размеров дендрита увеличивается разность потенциалов между острием и точкой диэлектрика, где его развитие тормозится, что также может приводить к повышению интенсивности ЧР и температуры в области разрушения.

На основании установленных закономерностей в [21] был предложен способ контроля предпробивного состояния диэлектриков, основанный на регистрации моментов появления второго и третьего температурных скачков на поверхности диэлектриков и линейной корреляционной связи между интервалом времени $\Delta\tau_3=\tau_3-\tau_2$ и временем до пробоя полимерных диэлектриков. Однако этот способ имеет тот существенный недостаток, что требует непрерывного контроля температуры поверхности диэлектрика и достаточно точного определения времени появления второго ΔT_2 и ΔT_3 третьего температурных скачков.

В реальных условиях эксплуатации изоляционных конструкций (изоляторов, кабелей и т.д.) нагрузка, как правило, осуществляется скачком, при этом скорость нарастания напряжения определяется параметрами коммутирующей аппаратуры. При таком способе нагружения высоковольтных конструкций скорость нарастания существенно выше, чем при плавном подъеме. В этом случае временем нарастания напряжения можно пренебречь и контроль изоляции можно осуществлять от момента подачи напряжения до появления локального перепада температуры ΔT_1. В этой связи представляло интерес оценить взаимосвязь между временем появления локального перепада температуры (ΔT_1) и временем до пробоя диэлектриков. Результаты обработки экспериментальных данных показали, что связь между τ_1, τ_3 и $\tau_{пр}$ нелинейна, при этом время τ_3, при котором начинается непрерывный рост одного из каналов дендрита, и время до пробоя $\tau_{пр}$ диэлектриков можно оценить по эмпирическим формулам:

$$\tau_3=\tau_1\exp(\sqrt{2\varepsilon}),\quad \text{с} \qquad (1)$$

$$\tau_{пр}=1{,}1892\tau_1\sqrt{\varepsilon}\exp(\sqrt{2\varepsilon}),\quad \text{с} \qquad (2)$$

где τ_1 – время от момента подачи напряжения до появления локального перепада температуры на поверхности диэлектрика ΔT_1; ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика (ε=3,68 – для ПММА и ε=2,3 – для ПЭНП).

В формулах (1) и (2) показатель экспоненты $\sqrt{2\varepsilon}$ равен модулю комплексной диэлектрической проницаемости $|\varepsilon^*|=\sqrt{\varepsilon'^2+\varepsilon''^3}$ при условии равенства действительной ε' и мнимой ε'' частей комплексной диэлектрической проницаемости. Следовательно, предэкспоненциальный множитель в (2) имеет физический смысл комплексного показателя преломления.

Результаты оценки τ_3 и $\tau_{пр}$ по (1) и (2) приведены в таблице, из которой видно, что разница между экспериментальными и расчетными значениями этих параметров не превышает ±10 %, что достаточно для осуществления индивидуальной диагностики предпробивного состояния как полярных, так и неполярных диэлектриков.

Необходимо отметить, что аналогичное условие ($\varepsilon'=\varepsilon''$) при пробое ПЭНП и многокомпонентных полярных диэлектриков было установлено в [11, 22] для случаев неоднородного и однородного внешнего поля. В то же время, в зависимости от коэффициента неоднородности поля изоляционных конструкций, процесс развития разрушения может включать не три, а одну стадию [23]. Например, при коэффициенте неоднородности поля $k=E_m/E_{ср}\to1$ (E_m – максимальная напряженность поля на электроде с меньшим радиусом кривизны; $E_{ср}=U/d$ – среднее значение напряженности поля в изоляционном промежутке), общее время до пробоя практически равно продолжительности инкубационной (додендритной) стадии старения диэлектриков. Поэтому наиболее перспективной является диагностика начальной стадии разрушения полимерных диэлектриков в электрическом поле, что требует проведения дополнительных исследований при более высоком температурном разрешении тепловизора. Результаты таких исследований мы надеемся представить в следующей статье.

Выводы

1. Процесс зарождения и развития разрушения в полимерных диэлектриках в резконеоднородном внешнем поле сопровождается ступенчатым характером изменения перепада температуры на их поверхности в 1,5...2 раза.
2. Установлено, что независимо от условий эксперимента между временем появления локального перепада температуры на поверхности диэлектриков и временем до их пробоя существует нелинейная корреляционная связь. На основании установленной взаимосвязи предложены эмпирические соотношения, позволяющие оценить время, при котором начинается непрерывный рост одного из каналов дендрита, и время до пробоя диэлектриков.
3. Тепловизионный метод позволяет осуществлять диагностику предпробивного состояния и времени до пробоя как полярных, так и неполярных диэлектриков; при температурном разрешении 0,2 °С погрешность оценки времени пробоя не превышает ±10 %, что достаточно для практических целей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, Ленинград, 1979. – 224 с., ил.
2. Ильченко Н.С., Кириленко В.М. Полимерные диэлектрики. – Киев: Техника, 1977. – 170 с., ил.
3. Уайтхед С. Пробой твердых диэлектриков / Пер. под ред. В.Т. Ренне. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 270 с., ил.
4. Wolter K.D., Jonson J.F. Degradation product analysis for polymeric dielectric materials exposed to partial discharge // IEEE Trans. Elect. Insul. – 1978. – V. 13. – № 5. – P. 327–366.
5. Лебедев С.М. Прогнозирование ресурса полимерной изоляции по значению напряженности внутреннего электрического поля // Электричество. – 1987. – № 6. – С. 57–58.
6. Ушаков В.Я., Робежко А.Л., Ефремова Г.В. Закономерности развития разрушения полимеров при длительном нагружении электрическим полем // Физика твердого тела. – 1984. – Т. 26. – в. 1. – С. 45–49.
7. Робежко А.Л., Важов В.Ф., Ефремова Г.В., Лебедев С.М., Ушаков В.Я. Кинетика разрушения твердых полимеров при длительном нагружении электрическим полем // Физика твердого тела. – 1981. – Т. 23. – в. 11. – С. 3360–3365.
8. Tanaka T. Space charge injected via interfaces and tree initiation in polymers // IEEE Trans. Diel. Elect. Insul. – V. 8. – № 5. – 2001. – P. 713–743.
9. Tanaka T., Greenwood A. Effect of charge injection and extraction on tree initiation in polyethylene // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. – 1978. – V. 97. – № 5. – P. 1749–1757.
10. Гефле О.С. Оценка интегрального перепада температуры на начальной стадии разрушения полимерных диэлектриков в сильном электрическом поле // Электричество. – 1988. – № 6. – С. 84–88.
11. Boggs S.A. Theory of a defect-tolerant dielectric system // IEEE Trans. Elect. Insul. –1983. – V. 28. – № 3. – P. 365–370.
12. Mason J.H. Breakdown of solid dielectrics in divergent fields // Proc. IEE. – 1955. – V. 102. – Part C. – P. 254–263.
13. Shimizu N. Electrical tree initiation // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 1988. – V. 5. – № 5. – P. 651–659.
14. Zabel K. Strominstabilitäten beim elektrischen Hochfeldleitungsprozeβ in PET // Potsdam. Forsch. – 1987. – № 51. – S. 190–196.
15. Вершинин Ю.Н., Зотов Ю.А. Перегревная неустойчивость в кристаллических изоляторах в предпробивном электрическом поле // Физика твердого тела. – 1975. – Т. 17. – в. 3. – С. 826–833.
16. Вершинин Ю.Н. Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. – Екатеринбург: УрО РАН, 2000. – 260 с., ил.
17. Мыльников В.С., Воронин С.П. Осцилляции тока и свечения в органических полимерах в сильных электрических полях // Журнал технической физики. – 1980. – Т. 50. – в. 1. – С. 170–171.
18. Вершинин Ю.Н. Электрический пробой твердых диэлектриков. Основы феноменологической теории и ее технические приложения. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1968. – 210 с., ил.
19. Mosch W., Pilling J., Tschacher B. Kanaleinsatzzeit und Durchschlagzeit zur Beurteilung des Langzeitverhaltens von Feststoff // Elektrie. – 1972. – H. 11. – S. 312–319.
20. Noto F., Yoshimura N., Nishida M., Fukuzono T. Tree growth in polyethylene by applying dc and impuise voltage // IEEE Conf. Rec. Int. Symp. Elec. Insul. – 1978. – P. 126–129.
21. Гефле О.С. Применение тепловизионного метода для диагностики состояния высоковольтных конструкций // Электричество. – 1985. – № 4. – С. 58–59.
22. Gefle O.S. Critical parameters of imperfect dielectrics in strong electric field // Proc. 9th Intern. Symp. High Volt. Eng., Aug. 27–Sep. 1. – 1995. – paper № 1070.
23. Гефле О.С., Ушаков В.Я. Метод определения "кривых жизни" монолитной полимерной изоляции // Электричество. – 1985. – № 8. – С. 65–67.